

高品質放電加工面の形成に関する研究 (第3報)

—各種粉末混入加工した加工面の熱処理の影響—

佐野 正明・橋田 鉄雄・山田 博之

Formation of High Quality Surface by EDM (3rd Report)

—Influence of Heat Treatment on EDMed surface included various powders—

Masaaki SANO, Tetsuo KITTA and Hiroyuki YAMADA

要 約

形彫り放電加工面における高品質表面創成を目的として、加工液 (EDF-K) 中にTi粉末を (20g/l, 40g/l, 60g/l) 混入し、金属電極を用いて、熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) に仕上げ領域のエネルギー条件で放電加工を行い、得られた加工面の熱影響と熱処理効果について検討した。加工液中にTi粉末を混入した場合、最表面にはきわめて硬い層が形成され、粉末混入量の増加に伴い、その硬さは増加した。加工表面の主成分はC, FeおよびTiであり、Ti粉末混入量の増加に伴いTi量は増加し、逆にFe量は減少する形態となった。この形成層はX線回折による分析からTiCであることが認められた。

1. 緒 言

各種の金型加工において放電加工法は、複雑形状および高硬度材料の加工を高効率・高精度に行うことが可能であり、今後も発展が期待される分野である。しかし、放電加工は主として液中アーク現象による熱的溶融・除去作用を利用することから、金型製作に用いた場合、加工面に形成される変質層や加工欠陥の存在が加工面品質に大きく影響^{1), 2)}を与える。なお、放電加工後の表面の改質にはガス窒化処理やショットピーニング処理の有効性がすでに報告されて^{3), 4)}いる。また、放電加工での鏡面化や改質手法については (1) 粉末混入法^{5), 6), 7)}および (2) 圧粉体電極法⁸⁾、等、各種検討が行われており、金型製作において、これらの手法が適用可能となれば、加工面性状の向上や、磨き工程の短縮等に有効な手段となる。

そこで、形彫り放電加工面における高品質な表面創成を

目的とし、加工液 (EDF-K) 中にTi系粉末を混入し、金属電極を用いて熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) に放電加工を行った。得られた加工面について、加工条件、表面あらさ、表面の成分分析および断面観察等から形成層の諸特性と熱処理効果についてを検討した。

2. 実験方法

実験は三菱電機製放電加工機 (M35K/G70) を用い、Fig.1に示す装置により行った。試験片 (Work) の熱間金型用合金工具鋼 (SKD61) は、焼入れ-焼戻し処理を行い、48HRC (490HV) の硬さとした。電極は直径10mmの銅を用いた。また、加工液中に混入した粉末は、比強度が高く、耐摩耗性・耐食性に優れたTi粉末 (粒径 ϕ 10~20 μ m) であり、液中に一定割合 (20g/l, 40g/l, 60g/l) を混入した。放電加工は各液とも2個のスターラーにより加工液を循環・攪拌し、電極極性をマイナス (正極性) とし、実験値 i_e : 2A, t_e : 4 μ s, t_o : 4 μ sの条件で15分間行った。加工面の評価は表面あらさおよび硬さ測定を、また加工液中の粉末成分の試験片への移行形態等については、エネルギー分散型X線分析装置 (EDS) 等により検討した。

3. 結果および考察

3-1 断面組織観察について

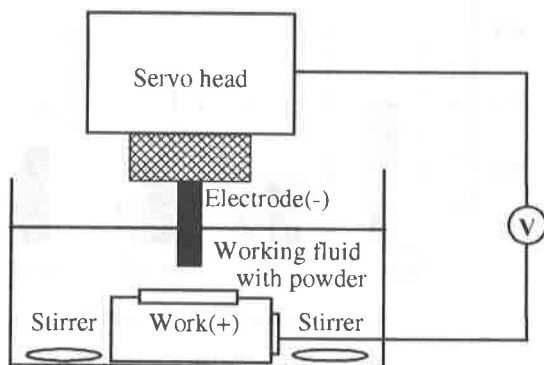


Fig. 1 Schematic view of testing apparatus

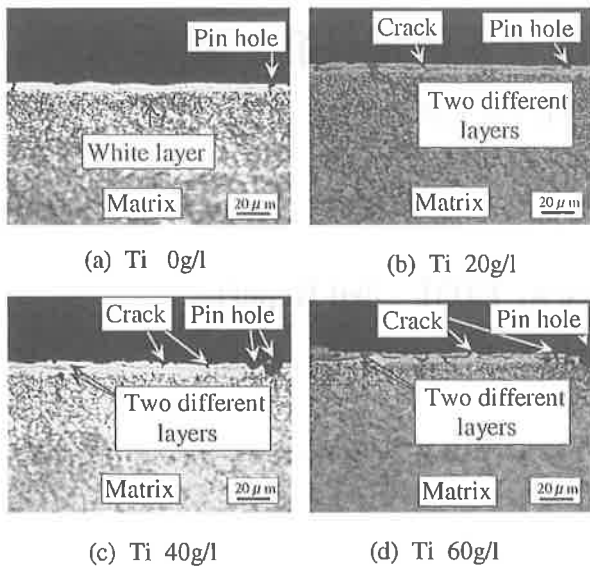


Fig. 2 Microscopic observation for cross-section of EDMed surface

Fig. 2 に試験片断面の金属顕微鏡による観察結果を示す。図 (a) は加工液中にTi粉末を混入しない場合 (Ti 0g/l)、表面には7~8 μm程度の加工変質層がほぼ均一に形成されており、わずかにピンホールの存在が観察された。加工液中にTi粉末を20g/l混入した (b) は、上層部と下層部に分かれた組織の異なる2種類の加工変質層の形成が観察された。更に、加工液中にTi粉末を40g/l混入した (c) の場合、および60g/l混入した (d) では、変質層内部の境界が明確に認められた。加工液中にTi粉末を混入したいずれの試験片とも、上層部には不均一な改質層厚さが形成され、開口部の大きいクラックの存在が観察された。

3-2 硬さ測定

薄膜の硬さ測定の場合は、測定荷重の大きさにより母材硬さの影響を受けるため、予備実験で測定荷重は母材への

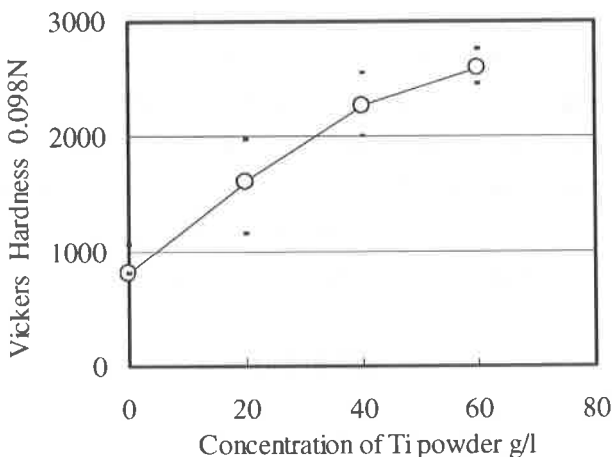


Fig. 3 Effect of Ti powder concentration on vickers hardness of EDMed surface

影響が比較的小さいと考えられる0.098N (10gf) とした。Fig. 3 は各試験片における硬さ測定結果を示す。加工液中にTi粉末を混入しない場合の硬さは、約800HVを示した。この時の素材硬さは490HV程度であることから、最表面には硬い層が形成 (放電加工変質層) されていることが認められる。

加工液中にTi粉末20g/l混入した場合、通常の灯油中での加工に比べ硬さは増加し1600HV程度であった。更にTi粉末混入量を多くした場合の硬さは40g/lの時2300HV、60g/lの時2600HVと硬くなる傾向を示した。よって、通常の放電加工に比べ、最表面には母材と異なる硬化層が形成されることになる。

Ti粉末の混入により、表面硬さが上昇する原因として、加工液中のTi粉末が放電時の熱エネルギーにより溶融し、加工物である試験片側に移行し、容着・拡散したものと考えられる。しかし、純チタンの硬さは260HV程度であることから、加工液中のTi成分が加工液の燃焼によるC成分と結合し、表面近傍にチタン炭化物が形成されたものと考えられている。

3-3 EDSによる表面分析

Fig. 4 は各試験片表面におけるEDSによる定量分析結果を示す。分析元素は主成分であるFe, CおよびTi元素について行った。なお、今回の分析条件におけるX線透過深さは2 μm程度であるため、分析領域は変質層の範囲内である事を確認している。

加工液中にTi粉末を混入しない場合での分析結果はCとFeが主成分として検出された。Feは鋼中に含まれる成分によるものであるが、Cは鋼中には微量 (SKD61は0.4wt%) であることから、加工液の燃焼生成により供給されたものと考えられ、表面には鉄炭化物が形成¹⁰⁾ されているものと

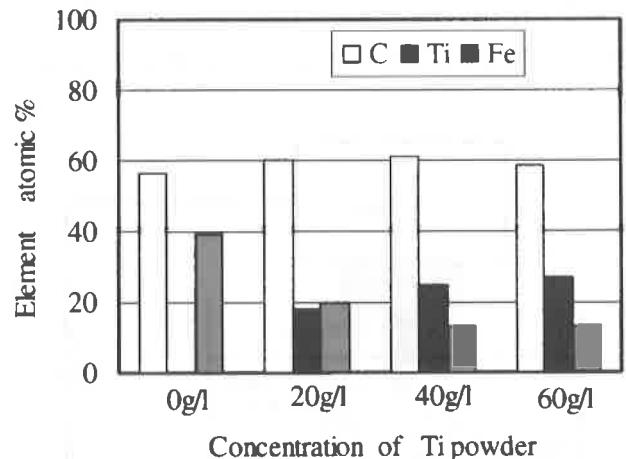


Fig. 4 Element analysis by EDS of EDMed surface with Ti powder

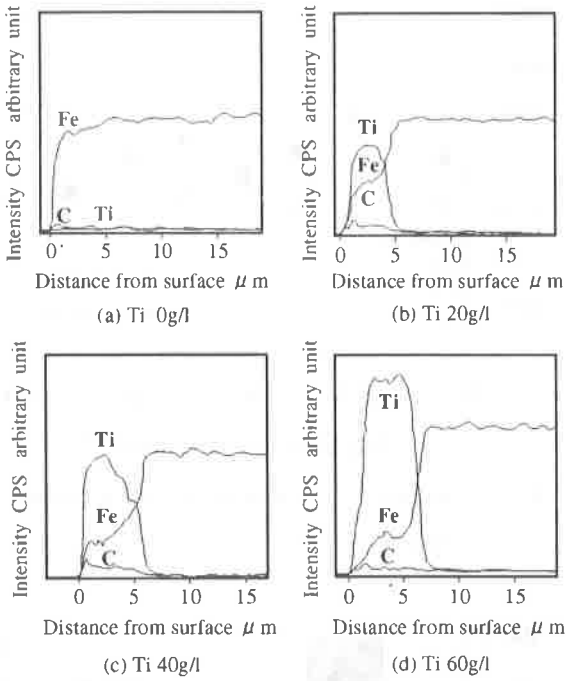


Fig. 5 Line analysis by EDS of EDMed surface with Ti powder

推察される。

また、加工液中にTi粉末を混入した場合、表面には新たにTi成分が検出されたが、これは前述のように加工液中に混入したTi成分が放電加工時の熱エネルギーにより、試験片側に移行したものと考えられる。更にTi粉末混入量の増加(40g/l, 60g/l)とともに、Ti成分量は増大し、逆にFe成分量は減少する傾向を示した。この時C成分量はTi粉末混入量によらずほぼ一定(約60at%)であった。

3-4 断面におけるEDSによる線分析

Fig. 5 に各試験片の最表面から深さ方向へのEDSによるFe, CおよびTi成分についての線分析結果を示す。

図(a)に見られるように加工液中にTi粉末を混入しない場合は、Fe成分が多く検出されている。しかし、Ti粉末を20g/l混入した(b)は、最表面近傍にTi成分が明確に観察され、Fe成分は逆に減少した。Ti粉末混入量の増加に伴い(c)および(d)は、Fe成分に対するTi成分の割合が増加し、深さ方向へのTi成分の混在領域も深くなること認められた。よってTi粉末混入量の増加によって形成された加工変質層内には、Ti成分濃度が傾斜合金的な組成になっている。

3-5 X線回折図形の観察

Fig. 6 は各試験片表面におけるX線回折図形を示す。なお今回の分析条件でのX線透過深さは15μm程度である。加工液中にTi粉末を混入しない場合は、αFe, γFeおよび

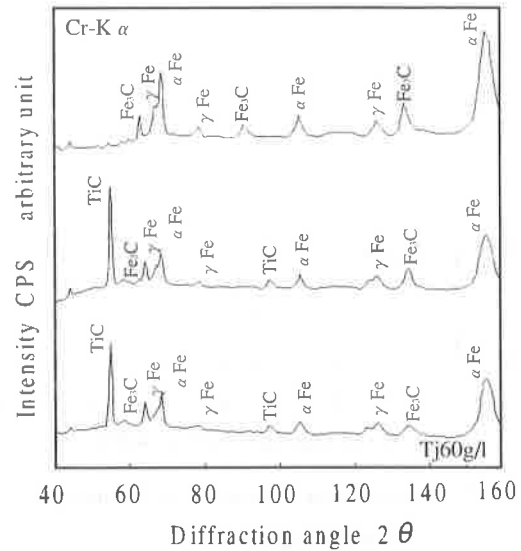


Fig. 6 X-ray diffraction profile for EDMed surface with Ti powder

Fe₃Cの各回折線が認められた。Ti粉末を20g/lおよび60g/l混入した場合には、TiC化合物の回折線が新たに認められ、回折線ピーク強度もαFeおよびγFeに比べ、増大する傾向を示した。

このことにより、加工液中にTi粉末を混入し加工した場合、表面硬さの向上は、TiCの形成に起因することが明らかとなった。CVD等により生成されたTiC皮膜の硬さは、3200HV^{0.05}程度であるが、今回の値はそれに比べるとやや低下の傾向にある。

これは、Ti粉末を混入した場合、表面に形成される変質層は完全なチタン炭化物だけではなく、母材と反応した鉄炭化物も形成され、両者が混在していることにより、硬さが低下するものと思われる。また、加工液中のTi粉末混入量の増加とともに硬さが増大することは、極間においてTi粉末を介して放電の発生頻度が高くなり、変質層の形成とともに、Fe系炭化物の形成に比べチタン炭化物の形成割合が増加するためであると考えられる。

3-6 表面観察について

Fig. 7 に試験片の表面あらさを、Fig. 8 に試験片表面の走査型電子顕微鏡(SEM)観察結果を示す。加工液中にTi粉末を混入しない場合での表面あらさは0.3μmRaと良好であったが、Ti粉末を混入することにより粗くなる傾向が観られた。加工液中にTi粉末を40g/l混入した場合は、1.2μmRaと通常放電で得られた値の約4倍程度になった。

SEMによる観察結果で、各試験片ともに表面にはクラックの存在が確認された。また、Ti粉末を混入した場合、起伏の激しい放電痕形状が明確に観察され、更に、放電痕の周りにはしわ状態が観察され、Ti粉末混入量の増加とと

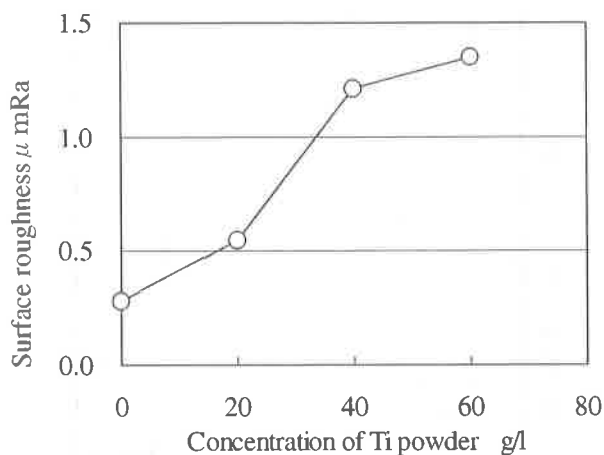


Fig. 7 Influence of Ti powder concentration on surface roughness

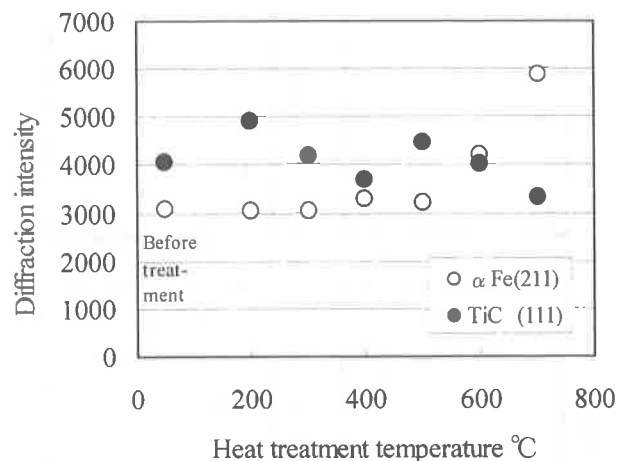


Fig. 9 Influence of heat treatment on diffraction intensity

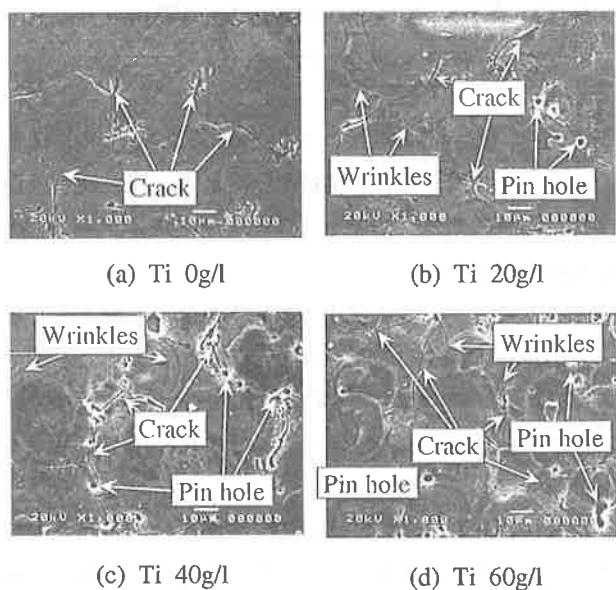


Fig. 8 SEM image of EDMed surface

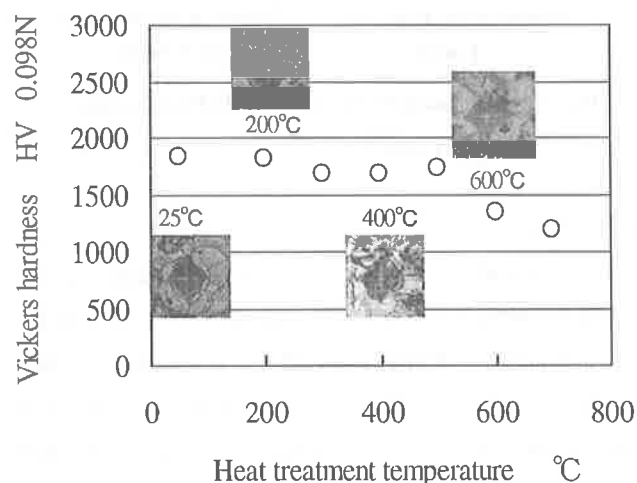


Fig. 10 Influence of heat treatment on vickers hardness

もにより明確になることが明かとなった。

これらの形成は、放電により一度溶融した成分が加工液により冷却され、凝固する過程で発生したものと考えられる。加工液中に混在するTiおよび鋼中のFeの融点は同程度 (Fe: $\theta_m=1668^\circ\text{C}$, Ti: $\theta_m=1537^\circ\text{C}$) であり、加工初期の段階においては、試験片の溶融形態には明確な違いは認められないと考えられる。しかし、ある程度加工が進行すると (面が一様に加工された直後から)、加工初期の鉄成分リッチな表面状態から、鉄炭化物およびチタン炭化物混在状態へ変化する。その後の加工面はチタン炭化物リッチ状態へと移行する。このことから、チタン炭化物の存在割合は、加工液中へのTi粉末混入量の増加とともに増大する。

鉄炭化物およびチタン炭化物の高温下における物性値は大きく異なり、常圧でのTiCの融点は Fe_3C に比べきわめて高く (Fe₃C: $\theta_m=1500\sim 1600^\circ\text{C}$, TiC: $\theta_m=3257^\circ\text{C}$)、Fe₃Cが溶融温度に達した場合でも、TiCは完全に溶融にいたらな

い。よって、この半溶融状態から冷却された場合、半溶融層近傍にしわ状態が形成されるものと考えられる。

3-7 熱処理の影響について

加工液中にTi粉末を混入し、放電加工を行うことにより、放電加工面にはTiCの形成に伴う極めて硬い層が得られた。そこで得られた試験片に熱処理 (焼戻し処理) を行い、加工面の安定化とクラック抑止効果について表面状態の挙動から検討した。

Fig. 9 はTi粉末混入加工後の試験片に対し、各温度による熱処理を施したときの、試験片表面のX線回折分析から得られたTiC (111) 面と、 αFe (211) 面の回折線ピーク強度の変化を示す。なお、熱処理条件は真空中で所定温度 (200,300,400,500,600,700 $^\circ\text{C}$) に対し、1時間保持し、炉冷とした。 αFe (211) 面における回折線ピークは、300 $^\circ\text{C}$ までの温度域で明確な変化は認められなかったが、500 $^\circ\text{C}$ 以

Table 1

	Firstworking	Secondworking
(a)	Ie;2A,te;4 μ s, to;4 μ sTi20g/l(15min)	-----
(b)	Ie;2A,te;4 μ s,to;4 μ sTi20g/l(15min)	Ie;2A,,te;4 μ s,to;96 μ sTi20g/l(15min)
(c)	Ie;2A,te;4 μ s,to;4 μ sTi20g/l(15min)	Ie;2A,,te;4 μ s,to;4 μ sNopowder(1min)
(d)	Ie;2A,te;4 μ s,to;4 μ sTi20g/l(15min)	Ie;2A,,te;4 μ s,to;4 μ sSi20g/l(1min)

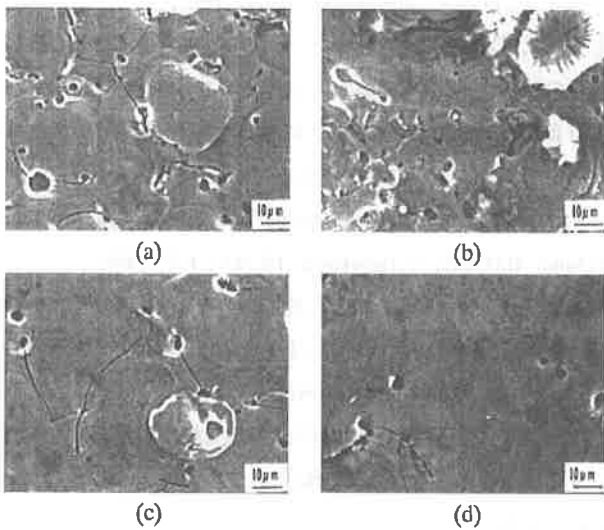


Fig.11 SEM imaged of multiple EDMed surface

上の温度域では急激に増加した。またTiC (111) 面では各温度域において明確な変化は認められなかった。α Feはこのような温度域において格子変化が起こるのに対し、TiCは格子変化が起こらなかつたものと考えられる。

Fig.10は熱処理後の試験片の硬さ測定および圧痕形状の観察結果を示す。熱処理前には1800HV程度の硬さが認められており、200℃の熱処理温度では硬さの変化はほとんど認められなかった。しかし熱処理温度が300℃、400℃ではやや減少し、500℃以上の温度域では、急激に低下し、700℃の熱処理温度では1300HV程度と著しく低下した。これは鋼の焼き戻し効果による硬さの減少傾向とほぼ一致する。

また圧痕形状は処理前および熱処理温度200℃の時は圧痕周りにクラックが多数存在しており、熱処理温度400℃の条件でも、わずかにクラックは存在し、熱処理温度600℃の条件では、明確なクラックは認められなかった。このことから熱処理を施すことにより硬さは低下するが、圧痕周りのクラックは抑止されることから耐衝撃強度は向上することが明かとなった。

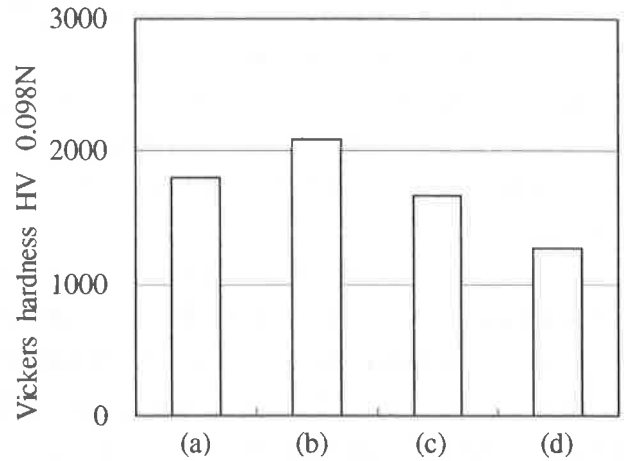


Fig.12 Influence of multiple working on

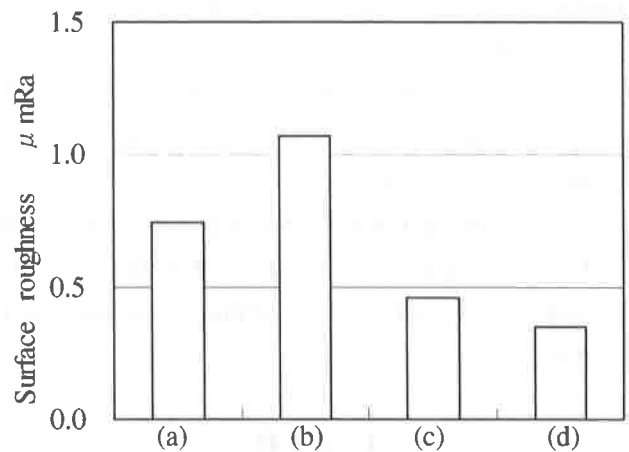


Fig.13 Influence of multiple working on surface roughness

3-8 複合加工について

加工液中にTi粉末を混入し、放電加工を行うことにより放電加工面には、極めて高い硬さの改質層が得られたが、表面あらさは悪くなる傾向を示した。そこで得られた加工面の表面あらさの改善を目的として、複合加工を試みた。

加工条件はこれまでと同様な条件で一次加工を行い、さらに各種条件で二次加工を行うことにより、二次加工が加工表面に及ぼす影響について調べた。一次加工および二次加工の条件をTable 1に示す。

Fig. 9に加工表面のSEM観察結果を示す。(b)はTi粉末混入加工液による一次加工後に同一加工液によりD.f(デューティ・ファクター)を小さくした条件で、二次加工を行った試験片表面を示すが、(a)の一次加工に比べピンホールやクラックの存在割合は多く観察された。これは一次加工と同一加工液であるため、D.fが小さくても、Tiを介して放電が発生した場合は一次加工と同様な現象が起こり、加工表面は更に悪くなったためである。また、(c)はTi粉末混入加工液での一次加工の後、通常加工液に変えて、二次加工を行った試験片表面を示すが、(a)の一次加工面

に比べ平滑な面を呈しており、ピンホールの存在割合は低下していた。(d)は、Ti粉末混入加工液による一次加工後に、Si粉末混入加工液に変えて二次加工した表面を示す。表面にはわずかにクラックやピンホールが観察されたが、(a)の一次加工面に比べ平滑な表面状態を呈しており、(c)よりも良好な面を示した。

これらの試験片表面の硬さ測定をFig.10におよび表面あらさ測定をFig.11に示す。(b)に示す試験片表面の硬さは一次加工時(a)1700HV程度だったのに対し、2000HV程度に増加していた。(c)および(d)に示す加工液を通常加工液およびSi粉末混入加工液に変えて、二次加工を行った試験片表面の硬さは一次加工面に比べ、1600HVおよび1300HVと低下していたが、この時の値は通常放電加工面に比べ高い硬さを示していた。

なお、その時の表面あらさは(b)の場合は(a)の一次加工面に比べ増大していたが、(c)および(d)の場合の表面あらさは向上していた。

このように通常加工液およびSi粉末混入加工液で二次加工を行うことにより、一次加工よりも硬さは低下するが、通常放電加工に比べ硬さが高く、表面あらさも良好な改質面が形成される。

4. まとめ

形彫り放電加工面における高品質な表面創成を目的とし、加工液(EDF-K)中にTi粉末を混入し放電加工を行い、得られた加工面について表面あらさ、表面の成分分析および断面観察等の検討において、以下のことが明らかとなった。

- 1) Ti粉末混入放電加工面には加工変質層が存在しているが、変質層は、組織の異なる2種類の層の形成が認められた。
- 2) Ti粉末混入加工時の最表面には通常の加工液では得られない極めて硬い層が形成されるが、しわを伴う起伏の大きい放電痕が観察され、表面あらさは大きくなる。また硬さおよびあらさも粉末混入量を増すに連れて増加する。
- 3) Ti粉末を混入することにより、通常の加工液中での加工表面に認められるFe、Cの他にTi成分の存在が明らかとなり、その存在割合は粉末混入量の増加に伴い増加した。また、X線回折による分析から最表面にはTiC化合物の形成が確認された。
- 4) Ti粉末混入加工液による加工後に熱処理を行った場合、硬さはやや低下するが、耐衝撃強度は向上することが明らかとなった。
- 5) Ti粉末混入加工液による加工後に通常加工液およびSi

粉末混入加工により二次加工を行った場合、硬さはやや減少するが表面あらさは向上し、通常加工液の加工に比べ硬化層の形成が認められた。

参考文献

- 1) 日原政彦, 藤原和徳, 向山芳世, 緒方勲;ダイカスト金型鋼に関する研究(第一報), 精密工学会誌, Vol.55, No.10, P.1869 (1989)
- 2) 向山芳世, 日原政彦;熱疲労に基因する放電加工面品質の研究(第一報), 電気加工学会誌, Vol.24, No.48, P.24 (1992)
- 3) 佐野正明, 日原政彦, 八代浩二, 萩原茂, 萩原義人, 向山芳世;金型鋼における仕上げ放電加工面の熱疲労特性(第四報), 精密工学会春季学術講演会講演論文集, P.971 (1995)
- 4) 佐野正明, 日原政彦, 八代浩二, 向山芳世;複合処理した放電加工面の熱疲労挙動, 電気加工学会誌, Vol.31, No.68, P.1 (1997)
- 5) 齊藤長男, 毛利尚武;大面積放電加工における仕上げ面あらさの向上, 精密工学会誌, Vol.57, No.6, P.954 (1991)
- 6) EDM by Powder Suspended Working Fluid; H. Narumiya, N. Mohri, N. Saito, H. Ootake, Y. Tsunekawa, ISEM-9, P.5 (1989)
- 7) 毛利尚武, 齋藤長男, 成宮久喜, 河津秀俊, 尾崎好雄, 小林和彦, 恒川好樹;粉末混入加工液による放電仕上げ加工, 電気加工学会誌, Vol.25, No.49, P.47 (1990)
- 8) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦;放電加工による表面処理-複合構造体電極法-;精密工学会誌, Vol.59, No.4, P.625 (1993)
- 9) 後藤昭弘, 真柄卓司, 今井祥人, 三宅英孝, 齋藤長男, 毛利尚武;放電加工による硬質被膜の形成, 電気加工学会誌, Vol.31, No.68, P.31 (1997)
- 10) 佐野正明, 橋田鉄雄, 高品質放電加工面の形成に関する研究(第2報), 山梨県工業技術センター研究報告No.13, P.33 (1999)
- 11) セラミックコーティング, P.67 (1988)
- 12) 熱物性ハンドブック, 日本熱物性学会編, P.22~25 (1990)